



DOI: 10.5846/stxb202103240777

冯思远, 赵文武, 韩逸. 变化环境下的生物多样性保护——第四届“一个星球”峰会述评. 生态学报, 2022, 42(5): 2050-2058.

变化环境下的生物多样性保护

——第四届“一个星球”峰会述评

冯思远^{1,2}, 赵文武^{1,2,*}, 韩逸^{1,2}

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875

摘要:2021 年 1 月 11 日, 由联合国、世界银行和法国共同发起的第四届“一个星球”峰会通过线上线下相结合的方式在巴黎举行, 本次峰会主题为生物多样性保护。峰会针对 4 个议题展开, 分别是: (1) 保护陆地和海洋生态系统; (2) 促进生态农业; (3) 生物多样性与资金筹措; (4) 保护人类健康、物种和热带森林。对变化背景下的生物多样性保护主要有以下几个方面的启示: (1) 识别优先保护区域, 提高保护区有效性; (2) 开展变化背景下的生态修复规划, 提高自然-社会生态系统抗风险能力; (3) 加强模型预测与情景分析, 发展生物多样性与生态系统服务集成模型; (4) 发展基于自然的解决方案, 可持续利用自然资源; (5) 加强后疫情时代国际间交流合作, 开展生物多样性保护资金筹措工作。

关键词:生物多样性; 生态系统功能; 生态系统服务; 可持续发展

1 峰会概况

人类和自然是一个耦合系统^[1]。自然为人类活动提供生产生活空间和生态系统服务^[2], 同时, 人类通过改变土地利用方式等活动对生态系统施加压力。进入人类世后^[3], 人类对生态系统服务的需求加速, 多项指标超出了地球的物理界限^[4], 带来了生物多样性丧失^[1, 5]和人类福祉减少等重大问题。约 75% 的地球陆地表面正面临着显著的人类压力, 生物多样性越高的地区经历压力越大^[6]。

面对生物多样性丧失的困境, 联合国制定了一系列缓和措施。1992 年, 150 多个缔约国在巴西里约热内卢举行的联合国环境与发展大会上签署了《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD), 以支持保护生物多样性、可持续地利用生物多样性组分以及公平公正地享有惠益^[7], 与其同期签署的还有《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)。《生物多样性公约》缔约国于 2002 年承诺到 2010 年降低生物多样性丧失速度, 虽然取得了一些成功, 但全球范围生物多样性丧失问题仍在不断加剧^[1]。2010 年 10 月 18 日至 29 日在日本爱知县名古屋举行的第 10 次公约缔约方大会 (COP10) 通过了经过修订和更新的《2011—2020 年生物多样性战略计划》, 其中包括 20 项爱知生物多样性目标 (简称“爱知目标”, Aichi Biodiversity Targets)。新计划的愿景是: 到 2050 年, 生物多样性得到重视、保护、恢复和理性利用, 维持生态系统服务, 维持一个健康的地球, 为所有人带来根本的惠益。2012 年 4 月, 联合国环境规划署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 整合了千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MA) 的后续行动和生物多样性科学知识国际机制 (International Mechanism of Scientific Expertise

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41861134038)

收稿日期: 2021-03-24; 网络出版日期: 2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn

on Biodiversity, IMoSEB), 成立了生物多样性和生态系统服务政府间科学-政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)^[8]。2019年,IPBES全球评估指出当前全球正面临着“史无前例”的自然衰退和物种灭绝率“加速”的局面,保护和恢复自然需要“革命性改变”^[9]。2020年9月,联合国《生物多样性公约》秘书处发布了第五版《全球生物多样性展望》(Global Biodiversity Outlook-5, GBO-5),报告呼吁,全球亟须进行8项变革,包括土地和森林转型、可持续农业转型、可持续粮食系统转型、可持续渔业和海洋转型、城市和基础设施转型、可持续淡水转型、可持续气候行动转型、包含生物多样性的“一体化健康”转型,以拯救地球,确保人类福祉^[10]。

2021年,新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)大流行背景下,人类对保护生态环境的意识明显提升,面临着与自然“和解”的机遇期。1月11日,由联合国、世界银行和法国共同发起的第四届“一个星球”峰会(One Planet Summit for biodiversity)通过线上线下相结合的方式在巴黎举行,本次峰会旨在就保护生物多样性凝聚共识并落实相关承诺,实现2050年碳中和目标,为2021年在中国昆明举行的联合国《生物多样性公约》第十五次缔约方大会(Fifteenth session of the Conference of the Parties, COP15)上达成“2020年后全球生物多样性框架”创造条件。本次峰会主题为生物多样性保护。峰会针对4个议题展开,分别是:(1)保护陆地和海洋生态系统(the protection of terrestrial and marine ecosystems);(2)推进生态农业(the promotion of agro-ecology);(3)生物多样性与资金筹措(the mobilization of funding for biodiversity);(4)保护人类健康、物种和热带森林(the link between deforestation, species and human health)。议题一(保护陆地和海洋生态系统)阐明保护区的现状和不足,倡议提高保护区效益,确保30%陆地和海洋生态系统得到保护;议题二(促进农业生态)强调减少国际间不平等,提高粮食安全与农业生态系统质量,改变集体发展模式;议题三(生物多样性与资金筹措)重点突出生物多样性现状,动员公共和私人融资以应对生物多样性破坏及气候变化;议题四(保护人类健康、物种和热带森林)从生物多样性丧失与传染病的角度出发,强调保护热带森林的重要性。峰会围绕着四个议题,三个主题(气候变化、生物多样性丧失、人类健康)强调采用一个方法(基于自然的解决方案)实现人与自然协调发展。本文根据会议主题梳理陆地和海洋生态系统、农业生态系统的生物多样性现状与压力,生物多样性与生态系统功能、生态系统服务的相关研究进展,以及生物多样性破坏对人类社会的反馈,以期为变化环境下的生物多样性保护提供参考。

2 变化环境下生物多样性研究进展

2.1 生物多样性现状与压力

生物多样性是指陆地、海洋和其他水生生态系统及其所构成的生态综合体,包括物种内部、物种之间和生态系统的多样性^[7]。生物多样性的丧失是生态系统变化的主要驱动力之一,其对生态系统的影响不弱于大气成分变化和气候变化^[11]。生物多样性丧失超过20%^[11]会对生态系统的功能和服务产生巨大影响^[12-17]。气候变化和人类活动影响了生物多样性和生态系统功能,生态系统功能的变化直接影响到生态系统服务,进而影响人类福祉,并反作用于全球变化。生物多样性可以通过间接影响生态系统功能和直接影响生态系统服务进而影响人类福祉。根据联合国粮食及农业组织(粮农组织)《2020年全球森林资源评估》报告,2015—2020年期间,全球去森林化速率每年约1000万 hm^2 。自然湿地覆盖面积持续减少,从1970—2015年,全球湿地范围趋势指数平均下降35%。生境也遭受严重且持续的破碎化和其他形式的退化,河流日趋破碎,进一步威胁淡水生物多样性^[10]。峰会指出,保护陆地和海洋生态系统濒危物种最重要且经过验证的解决方案之一是建立保护区。2010年《生物多样性公约》设定了保护17%的土地和10%的海洋的目标,十年后保护区面积增加了一倍以上,但只保护了15%的土地和7%的海洋。土地退化比全球平均80%的耕地退化速度快1.5倍,约三千万人面临粮食安全危机,陆地生态系统的恢复和可持续管理农业生态系统可以恢复1亿 hm^2 土地并固定2.5亿吨碳排放。促进绿色农业需要对退化生态系统进行生态修复,理解生物多样性和生态系统功能和服务之间的关系对于生态系统恢复非常重要^[18]。同时,减少有害农药的使用和风险,改变范式以加速农业环

境转型,减少粮食主权的不平等,提高粮食营养和健康安全,提高农业用水效率,进行农业基础设施生态恢复并发展可再生能源,提高土壤生产力,改善粮食安全,恢复土地并走向可持续发展。

变化环境背景下,除自然条件改变导致的生物多样性丧失外,人类活动和经济发展引起的栖息地丧失与破碎化、资源的过度利用、气候变化、环境污染、生物入侵以及动物疫病等,也是导致生物多样性丧失的主要因素^[19]。栖息地的破碎化使物种生存空间缩小^[19-20],阻碍个体或种群间的交流^[19, 21],导致物种数量减少或丧失。人类对动植物资源的过度利用导致非法利用增多^[19, 22],种群遗传特征变化^[19, 23],危害全球生物多样性。人类活动排放的温室气体导致全球变暖,改变物种生存环境,降低物种生存能力^[19, 24-25],同时物种对变化的生存环境产生适应性,改变遗传多样性^[19, 26]。环境污染通过直接影响生物的生存繁殖能力以及间接影响生物栖息地环境导致生物多样性丧失^[19, 27],从而影响生态系统服务和人类福祉。外来物种入侵加快本地物种的灭绝速度,导致生物多样性和遗传多样性丧失^[19, 28]。动物疫病危害生物多样性的现象以动物之间以及人畜共患病为主要表现形式,如严重急性呼吸综合征(Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS)、禽流感等。同时,生物多样性的丧失可能造成了新型冠状病毒肺炎大流行^[29]。栖息地丧失与破碎化、资源的过度利用、气候变化、环境污染、生物入侵以及动物疫病等作为生态系统受到的压力(Pressure, P),生物多样性破坏是生态系统响应外界压力的状态(State, S),流行病是生物多样性丧失对人类社会的反馈(Retroaction, R)。

2.2 生物多样性与生态系统功能及服务

生物多样性支撑了生态系统结构、功能与服务之间的关系^[30],生物多样性破坏作用于人类社会,研究生物多样性与生态系统功能及服务的关系,有利于更清晰的认识生物多样性破坏对人类社会的反馈作用。生态系统结构是指生态系统中生物和非生物要素的组成类型和丰度^[31],其是生态系统过程、功能和服务的物质基础和驱动力^[32]。这些相互作用的生物和非生物成分构成了生物多样性^[33],生物多样性是生态系统功能和生态系统服务产生的核心^[34]。生态系统服务(Ecosystem Services)是人类从生态系统中获得的各种惠益,生态系统服务包括支持服务、调节服务、文化服务、供给服务^[35-36]。生物多样性与生态系统服务关系研究集中在物种多样性(物种数量)、功能多样性(物种质量)、系统发育多样性(群落物种区系的组成、起源、演化)^[37]。生态系统功能(Ecosystem Functions)是指控制环境中能量、养分和有机物流动的生态过程,如初级生产、营养循环、分解、能量转移等^[12],生态系统功能包括生态系统过程、生态系统特性和生态系统稳定性^[38]。生物多样性与生态系统功能关系研究涉及生物多样性-生产力理论、生物多样性-稳定性理论、生物多样性-入侵理论^[39]。随着研究的深入,研究者发现生态系统能同时提供多项功能和服务,即生态系统多功能性(ecosystem multifunctionality, EMF)^[40]。生态系统多样性-生态系统功能(Biodiversity and Ecosystem Functions, BEF)以及生物多样性-生态系统服务(Biodiversity and Ecosystem Services, BES)研究显示,生物多样性促进生态系统多功能性^[41],同时,生态系统服务需要维持良好的生物多样性^[42]。

生态系统功能与生态系统服务二者相互联系,又各有不同。生态系统功能源自于生态系统,是以生态系统的完整性、稳定性和恢复力为基础。生态系统服务关乎人类需求和福祉,是链接人与自然的桥梁。生态系统功能是生态系统服务形成的基础,多项生态系统功能能够支持一项或多项生态系统服务。目前的生物多样性和生态系统功能研究并未针对生物多样性与生态系统功能指标之间的关系进行定量分析,对于两类指标之间的关系,已有研究往往是基于概念层面上的理论分析^[30]。此外,生态系统功能相关研究往往忽略与生态系统服务的链接关系,而生物多样性和生态系统服务研究也存在不了解其潜在生态系统过程和功能的现象^[12]。因此,需要加强生态系统多样性-生态系统功能和生物多样性-生态系统服务研究的联系,协同提升生物多样性与生态系统功能、生态系统服务。一般而言,生态系统服务受多种生态系统功能的制约,但这些功能不一定以相同的方式对生物多样性的变化做出反应,需要量化生态系统功能和服务之间的关系网络^[12]。生态系统功能研究侧重于群落小尺度,而生态系统服务研究侧重于局地大尺度,两者需要采用合适的方法进行尺度转换。同时,也需要加强情景预测,探讨在不同气候变化情境和人类活动情景状态下,生物多样性如何响应压力并对生态系统功能和服务产生影响。在以往生态系统多样性-生态系统功能和生物多样性-生态系统服务研

究基础上,为了避免只针对单一过程和功能开展研究的问题^[43],研究者开展了生物多样性-生态系统多功能性(Biodiversity and Ecosystem Multifunctionality, BEMF)研究。然而,现有研究主要集中在时空尺度、实验设计、测度多功能性的方法等方面^[43],缺少公认的测定多功能性指数的测度标准,生态系统不同功能之间的权衡及协同关系也制约着对多功能性的客观评价。同时,也存在缺少人工控制条件下的长期定量研究、所选环境变量的差别较大等问题^[44]。此外,也有学者用生态系统多功能性表征多服务特征,开展了多服务研究^[37]。下一步研究应从单一过程研究转向食物链、食物网的耦合研究,厘清导致生态系统功能和服务变化的关键要素,发展更本土化的模型,链接生态系统功能和服务。探究在变化背景下,生物多样性保护和土地可持续利用的路径。同时针对多功能性,开展长期的定量研究,完善多功能性的测度方法^[45],明确生态系统多功能的权衡协同关系,揭示生态系统多功能性对人类活动和气候变化响应的内在机制^[44]。

2.3 生物多样性与人类健康和森林保护

流行病源于自然界中的微生物多样性。由于人类活动(如土地利用变化、农业扩张和集约化、野生动物贸易和消费)引起的生物多样性丧失和气候变化可能造成了大流行的产生和发展^[29]。大多数(70%)新发疾病(如埃博拉、寨卡病毒、尼帕脑炎)和几乎所有已知流行病(如流感、艾滋病毒/艾滋病、COVID-19)都是人畜共患病^[46]。人类活动导致动物生境破碎化,增加了人与野生动物、牲畜之间的暴露度。新型冠状病毒肺炎大流行后如何实现人与自然和谐相处成为重要问题。一方面,哺乳动物和鸟类宿主中存在1.7亿种目前未发现的病毒,其中,63.1—82.7万种有能力感染人类^[29],人类依旧面临着其他大流行病的风险。另一方面,大流行导致的经济和生命财产损失是巨大且不可逆的,医疗水平的不同加剧了地区的不平等,如果不改变现状,人类难以承受多次大流行风险。生物多样性和生态系统服务政府间平台就生物多样性和流行病未来愿景提出了几项改进措施:(1)成立一个有关预防大流行传染病的高级别政府间理事会,制定预防大流行传染病的国际政府协议;(2)制定相关土地利用政策,降低土地利用变化对大流行病爆发的促进作用;(3)制定有关国际野生动物贸易的政策,减少人畜共患疾病风险;(4)支持“一个健康”(“one health”)的科学研究,以设计更好的对策来预防大流行病;(5)促进社会各部门协同合作,以减少大流行病风险^[29]。

森林提供了丰富的公共服务和私人物品,包括碳储存、生物多样性栖息地、水源涵养、防风固沙、减少疾病、木材和非木材产品等^[47-50]。气候变化加剧导致的野火以及人类活动的压力(如集约化耕作)使世界森林面积减少,在过去20年里,受到威胁的森林面积近1亿hm²。森林砍伐导致生境破碎化,生境破碎化是造成生物多样性下降的最主要原因之一^[51]。生物多样性丧失导致大流行的出现,保护热带森林,减少森林砍伐是预防大流行病的措施之一。土地使用者在利用土地时更偏向于选择其他土地用途的收益,而不是森林公共服务的利益,从而引起森林砍伐^[47]。其他导致森林砍伐的因素还有生物物理特征、商品市场需求、已建基础设施、人口和社会经济特征以及所有权和经营权等^[47]。峰会指出保护热带森林,减少森林砍伐应从两方面入手。一方面,对于森林生产国来说,政府应保障当地人民生存的权利,并引导资金支持居民生活,保证国民生计和环境保护齐头并进。发挥森林生产国当地居民的主观能动性,鼓励居民保护森林,设立奖惩机制,进行技术培训,建立社会企业的可持续金融方案。另一方面,对于森林消费国来说,贯彻落实欧盟将在2021年6月引入的第一部欧洲进口森林砍伐法。做好两个消费端的倡导——倡导消费者不购买导致森林砍伐公司的产品;倡导国家不与毁林为代价的国家进行贸易交易。同时,各方应筹集资金,发展新技术,追踪森林砍伐轨迹。

3 峰会启示

第四届“一个星球”峰会探讨了变化环境下的生物多样性保护的现状,结合新型冠状病毒肺炎大流行阐述了后疫情时代保护生物多样性的重要性,为达成“2020年后全球生物多样性框架”奠定基础。峰会对中国未来保护生物多样性研究的启示如下:

3.1 识别优先保护区域,提高保护区有效性

保护行动有助于防止物种灭绝,在过去的40年里,如果没有保护工作,哺乳动物、鸟类和两栖动物走向灭

绝的速度可能会高出 20%^[52]。保护区是保护生物多样性免受栖息地丧失影响的重要保护手段,但保护区网络仍然不完整,只有 42%的生态区域在保护区得到了很好的体现,所有受威胁的物种中仍有 78 种没有得到足够的保护。识别优先保护和有效管理的关键地点,同时辅以大规模的保护行动,以尽量减少生境的进一步破坏、退化和破碎势在必行。已有研究结合收益成本分析,运用多准则优化方法,确定了全球陆地生物群落的优先修复区域^[53]。通过叠加七个全球生物多样性保护优先区方案,并与人类影响较低区的叠加,识别出自然保护地认定的“高效益低成本区域”^[54],提出兼顾生物多样性与生态系统服务的保护区网络优化思路^[55]。识别优先保护区能够为全球制定《2020 年后全球生物多样性框架》提供决策支持和科学依据,为我国自然保护区的空间优化、国家公园体系总体布局提供科学依据,为其他国家保护地建设提供借鉴,提高保护区的有效性。

3.2 开展变化环境下的生态修复规划,提高自然-社会生态系统抗风险能力

早期开展的生物地理区划未能充分考虑人地关系,忽略了人类活动对生态系统的压力和生态系统服务对人类的惠益,在未来的生态修复规划中,应注意结合生物地理区划和生态功能区划^[56]。变化环境下,生态修复规划需要从生态与社会要素耦合的角度,纳入气候变化和人类活动。采用生物地理区划、生态功能区划相嵌套的手段,从生物地理和生态功能多个层次识别重点修复区域^[57]。识别导致生态系统退化的驱动因素,结合未来情景分析,预测气候变化和人类活动,进行变化环境下未来风险预测。此外,以往的生态修复规划和土地利用规划,忽略了人类健康。生态修复规划对调节气候变化和提供生态系统服务至关重要,应综合考虑健康因素,以避免因人类-牲畜-野生动物接触增加而引起潜在的大流行风险,实现后疫情时代的可持续发展^[58-60]。

3.3 加强模型预测与情景分析,发展生物多样性与生态系统服务集成模型

当前研究中的生物多样性和生态系统服务模型一般属于统计模型(关联模型)或过程模型(机理模型)^[30,61]。生物多样性模型包括以数理统计算法为主的物种分布模型、面向气候变化和人类活动的生态系统预测模型^[62]。以数理统计算法为主的物种分布模型由早期的 BIOCLIM、HABITAT、DOMAIN 等多基于规则判定的模型逐步发展为基于机器学习思想的概率分布模型,如最大熵模型 Maxent、人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、随机森林(Random Forest, RF)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)等^[63]。面向气候变化和人类活动的生态系统预测模型包括生物多样性范围模型(生物位为基础的模型、动态植被模型)、物种损失模型(物种-面积关系、IUCN 脆弱性经验评估、剂量效应模型)^[64]。生物多样性过程模型比生物多样性统计模型更加准确的描述生物与生物、生物与环境相互作用机理,但由于过程模型的有限性,模型对比和交互验证难度高于以数理统计算法为主的生物多样性统计模型^[62]。生态系统服务评估模型包括服务的供给模型、服务的需求模型和服务的价值模型^[30],常用的主要有 InVEST 模型、ARIES 模型和 SAORES 模型。生物多样性模拟结果作为生态系统服务模型的输入参数^[30,61],缺少与驱动力情景相结合的综合评估模型,需要研发满足基本预测精度和稳定性需求的生物多样性模型。此外,生物多样性模型与生态系统服务评估模型在输出结果上未能有效衔接。应考虑生态系统服务背后涉及的生物多样性与生态过程之间的级联关系及其驱动因素,以及不同驱动因素下生态系统服务与生物多样性和生态过程之间的关系。同时,考虑时空尺度问题,探究不同尺度之间的联系及尺度效应,发展生物多样性与生态服务集成模型。

3.4 发展本土化基于自然的解决方案,可持续利用自然资源

国际自然保护联盟将基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)定义为保护、可持续管理和改良生态系统的行动,以生态适应性的方式应对社会挑战,同时提高人类福祉和生物多样性^[65]。基于自然的解决方案并非是对自然的回归,而是强调人的引导作用,推动构建环境友好型的人工系统^[66]。我国利用基于自然的解决方案进行了更适应我国国情的应用,如全域土地综合整治、“海绵城市”的建设、国土空间规划、山水林田湖草系统治理、全域土地综合整治和耕地保护等^[67]。在农业生产区域,以全域土地综合整治为人工支持措施,开展了山水林田湖草生态保护修复,如气候智慧型农业(Climate-smart agriculture)、碳农作(Carbon farming)、再生农业(Regenerative Agriculture)、村庄更新(village renewal)等^[68]。“地貌重塑、土壤重构、植被重

建、景观重现、生物多样性重组与保护”理论,也在矿区生态修复领域得到应用,实现了“前期人工支持诱导、中后期靠自然修复”^[69]。“海绵城市”通过人工与自然相结合的方式,优化水的渗透、保留、储存、净化和排水,努力保留城市径流,实现雨水再利用,缓解城市建设对自然生态系统的负面影响^[64]。此外,我国有着深厚的生态农业传统,如稻田养鱼、作物间作的农业模式,粮、桑、渔结合的复合生态系统模式,猪粪喂鱼的综合利用模式,基于自然的解决方案对发展高质量现代化生态农业是新的机遇和挑战。基于自然的解决方案并非多种技术的简单叠加,也不是单纯的生态治理。基于自然的解决方案更强调在社会-经济-环境耦合系统中,利用科学技术发挥自然的主体修复作用,实现人与自然和谐相处,最终实现可持续发展目标^[64]。本土化基于自然的解决方案涉及到多学科的交流,应加强跨学科的交流。

3.5 加强后疫情时代国际间交流合作,开展生物多样性保护资金筹措工作

新型冠状病毒肺炎大流行给世界带来了深刻的社会、政治、经济和环境挑战^[29]。新型冠状病毒肺炎带来的直接影响是生命和财产的损失,同时疫情也带来了潜在的影响,如国家间交流壁垒的产生、国际贸易的减少等。后疫情时代各国交流降低,全球粮食贸易减少产生的远程耦合影响,不仅不利于粮食出口国的经济,也加剧了全球贫困和不平等。在过去的生物多样性保护工作中,筹集了一定的资金用以陆地、海洋生态系统的保护工作,但后疫情时代的生物多样性保护仍存在资金缺口。随着国家经济的复苏,应破除新型冠状病毒肺炎带来的合作壁垒,采用更多元化的方式筹集资金。建立公平开放的国际贸易环境,制定更有效的国际环境协定。实施“一个健康”方针,建设一个更有弹性的星球,实现人与自然和谐共生。联合国民间组织和政府机构,发挥个人和保护区当地居民的主观能动性。采用绿色的农业方法,一起应对气候变化和生物多样性保护问题,解决全球贫困和不平等问题。

参考文献(References):

- [1] 赵文武, 侯焱臻, 刘焱序. 人地系统耦合与可持续发展: 框架与进展. 科技导报, 2020, 38(13): 25-31.
- [2] Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van Der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [3] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C. The trajectory of the anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2015, 2(1): 81-98.
- [4] Hua T, Zhao W W, Wang S, Fu B J, Pereura P. Identifying priority biophysical indicators for promoting food-energy-water nexus within planetary boundaries. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 163: 105102.
- [5] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L K, Alhusseni T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L P, Martin C D, Meiri S, Novosolov M, Pan Y, Phillips H R R, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P W, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [6] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Jutta B, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7: 12558.
- [7] 联合国. 生物多样性公约(PDF). (1992). <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-zh.pdf>. (引用日期:2021)
- [8] Lan C Z, Tian Y, Xu J, Li J S. Conceptual framework and operational model of intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. *Biodiversity Science*, 2015, 23(5): 681-688.
- [9] 侯焱臻, 赵文武, 刘焱序. 自然衰退“史无前例”, 物种灭绝率“加速”——IPBES 全球评估报告简述. *生态学报*, 2019, 39(18): 6943-6949.
- [10] 生物多样性公约秘书处. 第五版《全球生物多样性展望》. [2020]. <https://www.cbd.int/gbo/gbo5/publication/gbo-5-zh.pdf>. (引用日期: 2021)
- [11] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, Byrnes J E K, Hungate B A, Matulich K L, Gonzalez A, Duffy J E, Gamfeldt L, O'Connor M I. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, 486(7401): 105-108.
- [12] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G

- C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486(7401): 59-67.
- [15] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [14] Hooper D U, Chapin III F S, Ewel J J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J H, Lodge D M, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad A J, Vandermeer J, Wardle D A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3-35.
- [15] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [16] Cardinale B J, Srivastava D S, Duffy J E, Wright J P, Downing A L, Sankaran M, Jouseau C. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature*, 2006, 443(7114): 989-992.
- [17] Cardinale B J, Matulich K L, Hooper D U, Byrnes J E, Duffy E, Gamfeldt L, Balvanera P, O'Connor M I, Gonzalez A. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 2011, 98(3): 572-592.
- [18] Li W, Buitenwerf R, Chequín R N, Florentín J E, Salas R M, Mata J C, Wang L, Niu Z, Svenning J C. Complex causes and consequences of rangeland greening in south America-multiple interacting natural and anthropogenic drivers and simultaneous ecosystem degradation and recovery trends. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(4): 304-316.
- [19] Wei F W, Nie Y G, Miao H X, Lu H, Hu Y B. Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(6): 430-437.
- [20] Newmark W D, Stanley T R. Habitat fragmentation reduces nest survival in an Afrotropical bird community in a biodiversity hotspot. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(28): 11488-11493.
- [21] Dixon J D, Oli M K, Wooten M C, Eason T H, McCown J W, Cunningham M W. Genetic consequences of habitat fragmentation and loss: the case of the Florida black bear (*Ursus americanus floridanus*). *Conservation Genetics*, 2007, 8(2): 455-464.
- [22] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Foran B, Lobefaro L, Geschke A. International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 2012, 486(7401): 109-112.
- [23] Allendorf F W, England P R, Luikart G, Ritchie P A, Ryman N. Genetic effects of harvest on wild animal populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(6): 327-337.
- [24] Molnár P K, Derocher A E, Klanjscek T, Lewis M A. Predicting climate change impacts on polar bear litter size. *Nature Communications*, 2011, 2: 186.
- [25] Malcolm J R, Liu C R, Neilson R P, Hansen L, Hannah L. Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conservation Biology*, 2006, 20(2): 538-548.
- [26] Karell P, Ahola K, Karstinen T, Valkama J, Brommer J E. Climate change drives microevolution in a wild bird. *Nature Communications*, 2011, 2: 208.
- [27] Hu G C, Luo X J, Dai J Y, Zhang X L, Wu H, Zhang C L, Guo W, Xu M Q, Mai B X, Weit F W. Brominated flame retardants, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in captive giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and red panda (*Ailurus fulgens*) from China. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4704-4709.
- [28] Simberloff D, Martin J L, Genovesi P, Maris V, Wardle D A, Aronson J, Courchamp F, Galil B, García-Berthou E, Pascal M, Pyšek P, Sousa R, Tabacchi E, Vilà M. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(1): 58-66.
- [29] Daszak P, Amuasi J, Das Neves C G, Hayman D, Kuiken T, Roche B, Zambrana-Torrel C, Buss P, Dunderova H, Feferholtz Y, Foldvari G, Igbinoza E, Junglen S, Liu Q, Suzan G, Uhart M, Wannous C, Woolaston K, Mosig Reidl P, O'Brien K, Pascual U, Stoett P, Li H, Ngo H T. IPBES (2020) Workshop report on biodiversity and pandemics of the intergovernmental platform on biodiversity and ecosystem services (IPBES). IPBES secretariat, Bonn, Germany, 2020, doi: 10.5281/zenodo.4147317.
- [30] 于丹丹, 吕楠, 傅伯杰. 生物多样性与生态系统服务评估指标与方法. *生态学报*, 2017, 37(2): 349-357.
- [31] Wallace K J. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, 2007, 139(3/4): 235-246.
- [32] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [33] Currie W S. Units of nature or processes across scales? The ecosystem concept at age 75. *New Phytologist*, 2011, 190(1): 21-34.
- [34] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 梁国付, 卢训令. 陆地生态系统服务与生物多样性研究进展. *生态学报*, 2016, 36(15): 4583-4593.
- [35] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [36] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press, 2005.

- [37] 文志, 郑华, 欧阳志云. 生物多样性与生态系统服务关系研究进展. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 340-348.
- [38] Naeem S, Chapin III F S, Costanza R, Ehrlich P R, Golley F B, Hooper D U, Lawton J H, O'Neill R V, Mooney H A, Sala O E, Symstad A J, Tilman D. Biodiversity and ecosystem functioning: maintaining natural life support processes. *Issues in Ecology*, 1999, 4: 2-12.
- [39] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2014, 45(1): 471-493.
- [40] Sanderson M A, Skinner R H, Barker D J, Edwards G R, Tracy B F, Wedin D A. Plant species diversity and management of temperate forage and grazing land ecosystems. *Crop Science*, 2004, 44(4): 1132-1144.
- [41] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [42] Isbell F, Calcagno V, Hector A, Connolly J, Harpole W S, Reich P B, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Tilman D, Van Ruijven J, Weigelt A, Wilsey B J, Zavaleta E S, Loreau M. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, 2011, 477(7363): 199-202.
- [43] 徐炜, 马志远, 井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. *生物多样性*, 2016, 24(1): 55-71.
- [44] 韩国栋, 康萨如拉, 赵茉莉, 王忠武. 草地生态系统多功能性研究概述. *草原与草业*, 2019, 31(4): 1-8.
- [45] 徐炜, 井新, 马志远, 贺金生. 生态系统多功能性的测度方法. *生物多样性*, 2016, 24(1): 72-84.
- [46] Jones K E, Patel N G, Levy M A, Storeygard A, Balk D, Gittleman J L, Daszak P. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 2008, 451(7181): 990-993.
- [47] Busch J, Ferretti-Gallon K. What drives deforestation and what stops it? A meta-analysis. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2017, 11(1): 3-23.
- [48] Rosero-Bixby L, Palloni A. Population and deforestation in Costa Rica. *Population and Environment*, 1998, 20(2): 149-185.
- [49] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [50] Myers S S, Gaffikin L, Golden C D, Ostfeld R S, Redford K H, Ricketts T H, Turner W R, Osofsky S A. Human health impacts of ecosystem alteration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(47): 18753-18760.
- [51] Saunders D A, Hobbs R J, Margules C R. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology*, 1991, 5(1): 18-32.
- [52] Hoffmann M, Hilton-Taylor C, Angulo A, Böhm M, Brooks T M, Butchart S H M, Carpenter K E, Chanson J, Collen B, Cox N A, Darwall W R T, Dulvy N K, Harrison L R, Katariya V, Pollock C M, Quader S, Richman N I, Rodrigues A S L, Tognelli M F, Vié J C, Aguiar J M, Allen D J, Allen G R, Amori G, Ananjeva N B, Andreone F, Andrew P, Ortiz A L A, Baillie J E M, Baldi R, Bell B D, Biju S D, Bird J P, Black-Decima P, Blanc J J, Bolaños F, Bolivar-G W, Burfield I J, Burton J A, Capper D R, Castro F, Catullo G, Cavanagh R D, Channing A, Chao N L, Chenery A M, Chiozza F, Clausnitzer V, Collar N J, Collett L C, Collette B B, Fernandez C F C, Craig M T, Crosby M J, Cumberlidge N, Cuttelod A, Derocher A E, Diesmos A C, Donaldson J S, Duckworth J W, Dutton G, Dutta S K, Emslie R H, Farjon A, Fowler S, Freyhof J, Garshelis D L, Gerlach J, Gower D J, Grant T D, Hammerson G A, Harris R B, Heaney L R, Hedges S B, Hero J M, Hughes B, Hussain S A, Javier I M, Inger R F, Ishii N, Iskandar D T, Jenkins R K B, Kaneko Y, Kottelat M, Kovacs K M, Kuzmin S L, La Marca E, Lamoreux J F, Lau M W N, Lavilla E O, Leus K, Lewison R L, Lichtenstein G, Livingstone S R, Lukoschek V, Mallon D P, McGowan P J K, McIvor A, Moehlan P D, Molur S, Alonso A M, Musick J A, Nowell K, Nussbaum R A, Olech W, Orlov N L, Papenfuss T J, Parra-Olea G, Perrin W F, Polidoro B A, Pourkazemi M, Racey P A, Ragle J S, Ram M, Rathbun G, Reynolds R P, Rhodin A G J, Richards S J, Rodríguez L O, Ron S R, Rondinini C, Rylands A B, De Mitcheson Y S, Sanciangco J C, Sanders K L, Santos-Barrera G, Schipper J, Self-Sullivan C, Shi Y C, Shoemaker A, Short F T, Sillero-Zubiri C, Silvano D L, Smith K G, Smith A T, Snoeks J, Stattersfield A J, Symes A J, Taber A B, Talukdar B K, Temple H J, Timmins R, Tobias J A, Tsytulina K, Tweddle D, Ubeda C, Valenti S V, Van Dijk P P, Veiga L M, Veloso A, Wege D C, Wilkinson M, Williamson E A, Xie F, Young B E, Akçakaya H R, Bennun L, Blackburn T M, Boitani L, Dublin H T, Da Fonseca G A B, Gascon C, Lacher T E, Mace G M, Mainka S A, McNeely J A, Mittermeier R A, Reid G M, Rodriguez J P, Rosenberg A A, Samways M J, Smart J, Stein B A, Stuart S N. The impact of conservation on the status of the world's vertebrates. *Science*, 2010, 330(6010): 1503-1509.
- [53] Strassburg B B N, Iribarrem A, Beyer H L, Cordeiro C L, Crouzeilles R, Jakovac C C, Junqueira A B, Lacerda E, Latawiec A E, Balmford A, Brooks T M, Butchart S H M, Chazdon R L, Karl-Heinz E, Brancalion P, Buchanan G, Cooper D, Díaz S, Donald P F, Kapos V, Leclère D, Miles L, Obersteiner M, Plutzer C, Scaramuzza C A D M, Scarano F R, Visconti P. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 2020, 586(7831): 724-729.
- [54] Yang R, Cao Y, Hou S Y, Peng Q Y, Wang X S, Wang F Y, Tseng T H, Yu L, Carver S, Convery I, Zhao Z C, Shen X L, Li S, Zheng Y M, Liu H, Gong P, Ma K P. Cost-effective priorities for the expansion of global terrestrial protected areas: Setting post-2020 global and national targets. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabc3436.

- [55] Xu W H, Xiao Y, Zhang J J, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu J G, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi X W, Rao E M, Lu F, Wang X K, Daily G C, Ouyang Z Y. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(7): 1601-1606.
- [56] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. *生态学报*, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [57] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- [58] Caichun Yin, Wenwu Zhao, Francesco Cherubini, Paulo Pereira. Integrate ecosystem services into socio-economic development to enhance achievement of sustainable development goals in the post-pandemic era. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 68-73.
- [59] Yichao Wang, Jingjing Yuan, Yonglong Lu. Constructing demonstration zones to promote the implementation of Sustainable Development Goals. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 18-24.
- [60] Chi Zhang, Wenjia Cai, Zhu Liu, Yi-Ming Wei, Dabo Guan, Zheng Li, Jinyue Yan, Peng Gong. Five tips for China to realize its co-targets of climate mitigation and Sustainable Development Goals (SDGs). *Geography and Sustainability*, 2020, 1(3): 245-249.
- [61] 潘玉雪, 田瑜, 徐靖, 张博雅, 李俊生. IPBES 框架下生物多样性和生态系统服务情景和模型方法评估及对我国的影响. *生物多样性*, 2018, 26(1): 89-95.
- [62] 刘焱序, 于丹丹, 傅伯杰, 曹铭昌, 陈吉星. 生物多样性与生态系统服务情景模拟研究进展. *生态学报*, 2020, 40(17): 5863-5873.
- [63] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 273-283.
- [64] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-77.
- [65] Cohen-Shacham E, Janzen C, Maginnis S, Walters G. *Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges*. Gland, Switzerland: IUCN, 2016: 1-33.
- [66] 陈梦芸, 林广思. 基于自然的解决方案: 一个容易被误解的新术语. *南方建筑*, 2019(03): 40-44.
- [67] 罗明, 应凌霄, 周妍. 基于自然解决方案的全球标准之准则透析与启示. *中国土地*, 2020, (4): 9-13.
- [68] 罗明, 杨崇曜, 张骁. 基于自然的全域土地综合整治思考. *中国土地*, 2020, (8): 10-13.
- [69] 白中科, 周伟, 王金满, 赵中秋, 曹银贵, 周妍. 再论矿区生态系统恢复重建. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 1-9.